



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 43 19 926 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
**G 05 B 13/02**  
G 05 B 17/00  
G 06 F 15/46

②1 Aktenzeichen: P 43 19 926.7  
②2 Anmeldetag: 16. 6. 93  
④3 Offenlegungstag: 23. 12. 93

DE 43 19 926 A 1

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1  
19.06.92 FR 92 07502

⑦1 Anmelder:  
Cegelec, Levallois-Perret, FR

⑦4 Vertreter:  
Spott, G., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat., 80336 München;  
Weinmiller, J., Dipl.-Ing., Pat.-Anwälte, 82340  
Feldafing

⑦2 Erfinder:  
Menahem, Marcel, Chanenay-Malabry, FR;  
Delesalle, Patrice, Verrieres-le-Buisson, FR

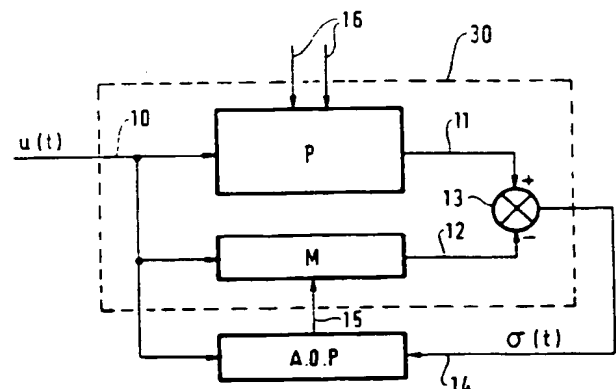
Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zur Regelung eines kontinuierlichen Prozesses mit einer Optimier- und einer Regelphase

⑤7 Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Regelung eines kontinuierlichen Prozesses (P) mit einer Optimierphase eines Modells (M), das für das Verhalten des Prozesses (P) repräsentativ ist, und mit einer Regelphase. In der Optimierphase

- wird eine Regelgröße (u) an den Prozeß (P) und an das Modell (M) angelegt, die so je ein Signal erzeugen,
- werden die beiden erhaltenen Signale an ein Subtrahierglied (13) angelegt, um ein Fehlersignal ( $\sigma$ ) zu erhalten,
- wird eine Korrektur des Modells (M) abhängig vom Fehlersignal ( $\sigma$ ) durchgeführt.

Erfindungsgemäß werden in der Optimierphase diskrete Interkorrelationsfunktionen zwischen dem Fehlersignal ( $\sigma$ ) und der Regelgröße (u) für unterschiedliche Zeitversetzungen ( $\tau$ ) der Regelgröße (u) bezüglich des Fehlersignals ( $\sigma$ ) gebildet, und das Modell wird so modifiziert, daß die Korrelation zwischen dem Fehlersignal ( $\sigma$ ) und der Regelgröße (u) verschwindet.



DE 43 19 926 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 10. 93 308 051/486

7/51

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf kontinuierliche Regelprozesse, in der Industrie und insbesondere auf die Identifizierung solcher Prozesse, die es erlaubt ein Modell zu bilden. Die Modellbildung der Prozesse ermöglicht dann die Regelung ihres Betriebs mit Hilfe von mathematischen Modellen, die während der Identifizierung des Prozesses optimiert worden sind.

Bekanntlich ist das Ziel der Identifizierung eines Prozesses im Hinblick auf dessen spätere Regelung einerseits, die Kennwerte des Prozesses zu bestimmen, wie z. B. die Eingrenzung der Gründe und Wirkungen äußerer Steuergrößen, und andererseits, den Einfluß der Umgebung, der von nicht meßbaren äußeren Ursachen bestimmt wird und den Prozeßablauf stören kann. Diese Identifizierung hat schließlich die Aufgabe, ein mathematisches Modell zu erzeugen, das das Verhalten des Prozesses einerseits gegenüber den äußeren Steuergrößen (Eingängen), die gezielt, beispielsweise von einer Bedienungsperson, auf den Prozeß angewandt und nachfolgend Regelgrößen genannt werden, und andererseits gegenüber den nicht meßbaren Eingangsgrößen beschreibt, die den Prozeß stören und nachfolgend als Störungen bezeichnet werden. Die Eingangsgrößen eines Prozesses werden so von den Regelgrößen und den Störungen gebildet.

Die Phase der Identifizierung eines Prozesses besteht also darin, seine Transferfunktion zu bestimmen, d. h. seine statischen und dynamischen Kennwerte, die es erlauben, in der Regelphase eine Veränderung der Regelgrößen durchzuführen, um den Betrieb des Prozesses im Umkreis von genauen Werten trotz des Vorliegens von Störungen zu stabilisieren.

Diese Regelung erfolgt mit Hilfe eines mathematischen Modells, das während der Identifizierungsphase des Prozesses definiert wird, wobei die Identifizierung gemäß Fig. 1 abläuft.

Fig. 1 ist ein Übersichtsbild der Identifizierungsphase eines kontinuierlichen Prozesses.

Ein Prozeß P, der geregelt werden soll, empfängt eine Regelgröße über seinen Eingang 10. Der Prozeß P liefert als Antwort auf diese Regelgröße ein Signal an seinem Ausgang 11, während ein mathematisches Modell M ebenfalls diese Regelgröße empfängt und als Antwort ein Signal an seinem Ausgang 12 liefert. Das mathematische Modell M ist ursprünglich ein Modell, dessen Verhalten grob dem des Prozesses P entspricht. Das Modell stellt also eine erste Auswahl aus einer gewissen Anzahl verfügbarer Modelle dar. Die Signale der beiden Ausgänge 11 und 12 gelangen an ein Subtrahierglied 13, das an den Eingang 14 eines Parameteroptimieralgorithmus AOP ein Signal  $\sigma$  liefert, das ein Fehlersignal darstellt. Dieses Fehlersignal  $\sigma$  entspricht der Differenz der Antwortsignale des zu regelnden Prozesses P und des mathematischen Modells M und sollte wenn möglich null sein, wenn das Modell M eine gute mathematische Abbildung des Prozesses P, d. h. seiner Transferfunktion darstellt.

Das Modell M besteht üblicherweise aus Differentialgleichungen, die den Prozeß P kennzeichnen, wobei die Parameter dieser Differentialgleichungen durch den Parameteroptimieralgorithmus über eine Verbindung 15 so verändert werden, daß das Fehlersignal  $\sigma$  sich möglichst weit dem Wert null nähert.

Diese Identifizierungsphase des Prozesses P dauert so lang wie nötig, bis sich ein Modell M ergibt, dessen Ansprechen auf die Regelgrößen in zufriedenstellender

Weise dem Ansprechen des Prozesses P auf diese gleichen Regelgrößen entspricht. Die Optimierung des Modells besteht also darin, die Parameter, von Differentialgleichungen so zu verändern, daß sie möglichst gut den Prozeß P kennzeichnen.

In bekannter Weise beruht der Parameteroptimieralgorithmus auf einer für den Fehler repräsentativen Funktion aufgrund folgender Beziehung:

$$\sum_{i=0}^n \sigma_i^2 \quad (1)$$

Hierbei entspricht  $\sigma_i$  dem Unterschied zwischen den Größen an den Ausgängen 11 und 12 zum Zeitpunkt i.

Der Fehler  $\sigma$  wird während der Beobachtungsdauer des Prozesses P n-mal getastet, und der Parameteroptimieralgorithmus verändert die Parameter der Differentialgleichungen des Modells derart, daß der Wert des Ausdrucks (1) zu null wird. Dieses Optimierkriterium besteht also darin, den Mindestwert der Summe der quadratischen Fehler zu suchen, und entspricht der Methode der kleinsten Quadrate.

Wenn ein geeignetes Modell gefunden wurde, dann wird das Modell M verwendet, um eine Regelung des Prozesses P durchzuführen. Ein Übersichtsbild dieser Regelphase ist in Fig. 2 dargestellt.

Der Verwender legt an einem Eingang 23 einen Sollwert entsprechend einer Steuerung an. Diese Steuerung gelangt an den Eingang 21 eines Korrekturorgans C, das eine Regelgröße an den Ausgang 22 liefert. Diese Regelgröße wird an den Prozeß P und an das Modell M angelegt. Der Prozeß P und das Modell M liefern an ihren jeweiligen Ausgängen 11 bzw. 12 ein Signal als Antwort auf diese Regelgröße.

Ist das Modell M vollkommen, d. h. verhält es sich bezüglich der Regelgröße genau so wie der Prozeß P, dann bedeutet dies, daß seine Transferfunktion der des Prozesses P gleicht und die Signale an den Ausgängen 11 und 12 ebenfalls gleich sind.

In der Praxis ist diese Gleichheit jedoch nie gewährleistet, einerseits, weil das Modell M für das Verhalten des Prozesses P aufgrund der Modellbildungsfehler nie exakt repräsentativ sein kann, und andererseits, weil der Prozeß P Störungen unterliegt die durch Pfeile 16 in Fig. 1 angedeutet sind, die aber nicht auf das Modell einwirken. Daher wird der am Ausgang 14 des Subtrahierglieds 13 verfügbare Unterschied  $\sigma$  ebenfalls mit Hilfe des Subtrahierglieds 20 vom am Eingang 23 verfügbaren Sollwert abgezogen, um eine Nachregelung des Betriebs des Prozesses P zu erreichen.

Da aber das in der Identifizierungsphase (Fig. 1) verwendete Optimierkriterium auf einer Verkleinerung des quadratischen Fehlers beruht, berücksichtigen die Parameter des Modells M sowohl das Verhalten des Prozesses P als auch das der Störungen 16. So hat das verwendete Optimierkriterium die Aufgabe, die Bildung eines Modells zu erlauben, das nicht dem nachzuregelnden Prozeß entspricht, da es die Störungen berücksichtigt, die den Betrieb dieses Prozesses verändern. Dieses Kriterium kann also keinen Unterschied zwischen den Modellbildungsfehlern und den Störungen machen und eignet sich daher nicht für die Herstellung eines wirklich für den Betrieb des Prozesses repräsentativen Modells. Das mit Hilfe dieses Kriteriums erhaltene Modell ist beispielsweise nicht optimal, wenn die Störungen zufällig auftreten. Damit nämlich das Modell das Verhalten des Prozesses gegenüber Störungen ebenso wie der

Prozeß nachbilden kann, ist es notwendig, daß diese Störungen bereits in gleicher Weise vorher aufgetreten sind. Sind die Störungen nicht mehr dieselben, dann muß das Modell einer neuen Identifizierungsphase unterworfen werden.

Außerdem kann dieses Optimierkriterium nicht auf Prozesse angewandt werden, deren Verhalten nichtlinear ist. Daher eignet sich das Optimierkriterium des Ausdrucks (1) nicht in allen Anwendungsfällen, und die durchgeführte Regelung ist somit nicht optimal.

Die vorliegende Erfindung hat insbesondere zur Aufgabe, diese Mängel zu beheben.

Genauer gesagt, ist eines der Ziele der Erfindung, ein Regelverfahren eines kontinuierlichen Prozesses anzugeben, das eine Optimierphase und eine Regelphase enthält und das es erlaubt, ein dem Prozeß identisches mathematisches Modell ohne Berücksichtigung der den Betrieb des Prozesses beeinträchtigenden Störung zu erhalten.

Ein anderes Ziel der Erfindung ist es, ein solches Verfahren anzugeben, das allgemein anwendbar ist, d. h. das unabhängig von dem zu regelnden Prozeß verwendbar ist.

Diese Aufgaben und Ziele werden durch das im Anspruch 1 definierte Verfahren gelöst bzw. erreicht.

Das Optimierkriterium ist also die Minimisierung der Interkorrelation zwischen der Regelgröße und dem Fehlersignal. So erhält man ein Modell, dessen Verhalten auf die Regelgröße dem des Prozesses in Abwesenheit von Störungen gleicht.

Bezüglich von Merkmalen bevorzugter Ausführungsformen der Erfindung wird auf den Unteranspruch verwiesen.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens mit Hilfe der beiliegenden Zeichnungen näher erläutert:

Fig. 1 ist ein Übersichtsbild, der Identifizierungsphase eines kontinuierlichen Prozesses, wobei die Identifizierung auf bekannte Art und Weise erfolgt und als Optimierkriterium die Verkleinerung der quadratischen Fehler verwendet wird.

Fig. 2 ist ein Übersichtsbild der Regelung des Prozesses, der mit Hilfe des in der Identifizierungsphase gemäß Fig. 1 definierten Modells identifiziert wurde.

Fig. 3 ist ein Übersichtsbild, das die Identifizierungsphase eines Prozesses darstellt, die nach einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung abläuft.

Die Fig. 1 und 2 wurden bereits anhand der Schilderung des Standes der Technik beschrieben.

Fig. 3 ist ein Übersichtsbild einer Identifizierungsphase eines Prozesses gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Der zu identifizierende Prozeß P und das zu definierende mathematische Modell M empfangen beide eine Regelgröße über die Verbindung 10 und liefern als Antwort Signale, die voneinander abgezogen werden, um ein Fehlersignal zu bilden. Das kontinuierliche Fehlersignal wird dem Parameteroptimieralgorithmus angeboten, der die Parameter des Modells verändert. Im Betrieb wird der Prozeß P durch nicht meßbare Störungen 16 gestört.

Das erfindungsgemäße Verfahren unterscheidet sich von dem gemäß Fig. 1 dadurch, daß das Optimierkriterium des Modells M auf dem Verschwinden der Korrelation zwischen der Regelgröße  $u(t)$ , die ebenfalls an den Parameteroptimieralgorithmus angelegt wird, und dem Fehlersignal  $\sigma(t)$  beruht. Daher definiert man ein Sy-

stem 30, das den Prozeß P und das Modell M enthält, wobei dieses System einen Regeleingang 10, einen Eingang für Störungen 16 und einen Ausgang 14 besitzt.

Solange eine Korrelation zwischen  $u(t)$  und  $\sigma(t)$  für eine gegebene Reaktionszeit des Systems existiert, ist das Modell nicht optimiert, und der Parameteroptimieralgorithmus bewirkt eine Änderung der Parameter des Modells M.

Der Parameteroptimieralgorithmus berechnet in diskreter Form folgende Formel:

$$\Phi_{u\sigma}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \sigma(t) \cdot u(t-\tau) dt$$

Hierbei entspricht  $\tau$  der Zeitverzögerung der Regelgröße bezüglich eines Fehlersignals,  $\sigma(t)$  dem Fehlersignal,  $u(t-\tau)$  der um eine Zeitdauer  $\tau$  bezüglich des Fehlersignals  $\sigma(t)$  vorgezogenen Regelgröße,  $\Phi_{u\sigma}(\tau)$  dem Korrelationskoeffizienten für die Zeitverschiebung  $\tau$  und T der Beobachtungsdauer des Prozesses.

Die Periode T wird so festgelegt, daß sie für den Betrieb des Prozesses repräsentativ ist. Sie liegt beispielsweise bei mindestens 5 mal der Reaktionszeit des Prozesses.

Der Wert dieser Korrelationskoeffizienten  $\Phi_{u\sigma}(\tau)$  gibt an, ob eine Beziehung zwischen der Regelgröße und dem Fehlersignal für den Wert der betrachteten Zeitverschiebung  $\tau$  existiert. Je größer dieser Koeffizient ist, desto deutlicher ist die Korrelation und desto weniger ist das Modell geeignet.

Diese Korrelation wird nämlich für eine Vielzahl von Werten von  $\tau$  gemessen, wobei  $\tau$  zwischen einerseits einem unteren Grenzwert und andererseits einem oberen Grenzwert variiert, entsprechend einer Reaktionszeit des Prozesses P auf die betrachtete Regelgröße. So erhält man nacheinander eine Mehrzahl von Korrelationskoeffizienten  $\Phi_{u\sigma}(\tau)$ .

Da die Korrelation diskret erfolgt, d. h. aufgrund einer Folge von Tastproben der Regelgröße und des Fehlersignals, besitzt man in jedem Augenblick ein Paar von Werten. Ein erster Wert entspricht der Regelgröße zum Zeitpunkt  $t-\tau$  und der zweite Wert entspricht dem Fehlersignal zum Zeitpunkt  $t$ . Die beiden Werte jedes Paares werden miteinander multipliziert, und die Produkte werden gemittelt. Der erhaltene Mittelwert entspricht dem Korrelationskoeffizienten für die Zeitverschiebung  $\tau$ .

Diese verschiedenen erhaltenen Koeffizienten für unterschiedliche Zeitverschiebungen  $\tau$  werden dann quadriert und addiert, d. h. daß der folgende Wert S berechnet wird:

$$\Phi_{u\sigma}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \sigma(t) \cdot u(t-\tau) dt$$

Dieser Wert S ist ein Maß für den Unterschied zwischen dem Modell M und dem Prozeß P. Der Parameteroptimieralgorithmus verändert die Parameter des Modells M, um diesen Wert S möglichst klein zu machen.

Wenn S im wesentlichen null ist, dann wird das Modell M als brauchbar für die Beschreibung des Verhaltens des Prozesses P betrachtet, und die in Fig. 2 dargestellte Regelphase kann so in Angriff genommen werden.

Wenn in dieser Regelphase das Modell dem Prozeß

entspricht, dann funktioniert das System in offener Schleife, d. h. daß nur die Störungen für Fehlersignale verantwortlich sind. Ein Betrieb in offener Schleife ermöglicht ein stabiles System. Während dieser Regelphase kann die Interkorrelationsfunktion dauernd berechnet werden, ohne die Parameter des Modells zu verändern. Ergibt sich eine von null verschiedene Korrelation mit signifikantem Pegel zwischen den Signalen  $u$  und  $\sigma$  während dieser Regelphase, dann wird eine neue Identifizierungsphase eingeleitet, um diese Korrelation zu null zu machen.

Das Verfahren zur Identifizierung von Prozessen gemäß der vorliegenden Erfindung ist auf alle Arten von Systemen anwendbar, ob linear oder nichtlinear. Es ergibt ein Modell, dessen Parameter die Störungen nicht berücksichtigen und das so den Betrieb des Prozesses genau wiedergibt.

Natürlich ist es möglich, ein anderes Kriterium zu verwenden, das die Messung der Korrelation zwischen der Regelgröße und dem Fehlersignal erlaubt, indem noch komplexere statistische Mittel eingesetzt werden. Es ist beispielsweise möglich, den Koeffizienten der Korrelationsfunktion unterschiedliche Wichtungen zu geben, um gewisse Teile der Kennwerte des Prozeßverhaltens zu gewichten.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung eines kontinuierlichen Prozesses (P) mit einer Optimierphase eines Modells (M), das für das Verhalten des Prozesses (P) repräsentativ ist, wobei in dieser Phase

- eine Regelgröße ( $u$ ) an den Prozeß (P) und an das Modell (M) angelegt wird, die so je ein Signal erzeugen,
- die beiden erhaltenen Signale an ein Subtrahierglied (13) angelegt werden, um ein Fehlersignal ( $\sigma$ ) zu erhalten,
- eine Korrektur des Modells (M) abhängig vom Fehlersignal ( $\sigma$ ) durchgeführt wird,

und mit einer Regelphase, in der an den Prozeß (P) und an das Modell (M) permanent eine von einem Korrekturorgan (C) kommende Regelgröße (22) angelegt wird, wobei dieses Korrekturorgan an seinem Eingang den Unterschied zwischen einem Sollwert (23) und dem Fehlersignal ( $\sigma$ ) aufgrund des Unterschieds zwischen den vom Prozeß (P) und vom Modell (M) gelieferten Ausgangssignalen empfängt, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Korrektur in der Erzeugung von diskreten Interkorrelationsfunktionen zwischen dem Fehlersignal ( $\sigma$ ) und der Regelgröße ( $u$ ) für unterschiedliche Zeitversetzungen ( $\tau$ ) der Regelgröße ( $u$ ) bezüglich des Fehlersignals ( $\sigma$ ) und in der Modifizierung des Modells (M) besteht, um ein Verschwinden der Korrelation zwischen dem Fehlersignal ( $\sigma$ ) und der Regelgröße ( $u$ ) zu erreichen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Erzeugung der diskreten Interkorrelationsfunktionen darin besteht, den Wert des Korrelationskoeffizienten  $\Phi_{u\sigma}(\tau)$  für jede Zeitversetzung ( $\tau$ ) zu bilden, gemäß folgendem Ausdruck:

$$\Phi_{u\sigma}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \sigma(t) \cdot u(t-\tau) dt$$

wobei  $\tau$  der Zeitversetzung der Regelgröße bezüglich

des Fehlersignals,  $\sigma(t)$  dem Fehlersignal,  $u(t-\tau)$  der um die Dauer  $\tau$  vorgezogenen Regelgröße und  $T$  der Beobachtungsdauer des Prozesses (P) entspricht, worauf die Summe (S) der Quadrate der entsprechenden Korrelationskoeffizienten gebildet wird, und daß die Veränderung darin besteht, das Modell (M) so zu korrigieren, daß diese Summe (S) der Quadrate der entsprechenden Korrelationskoeffizienten einen kleinsten Wert annimmt.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

FIG. 1

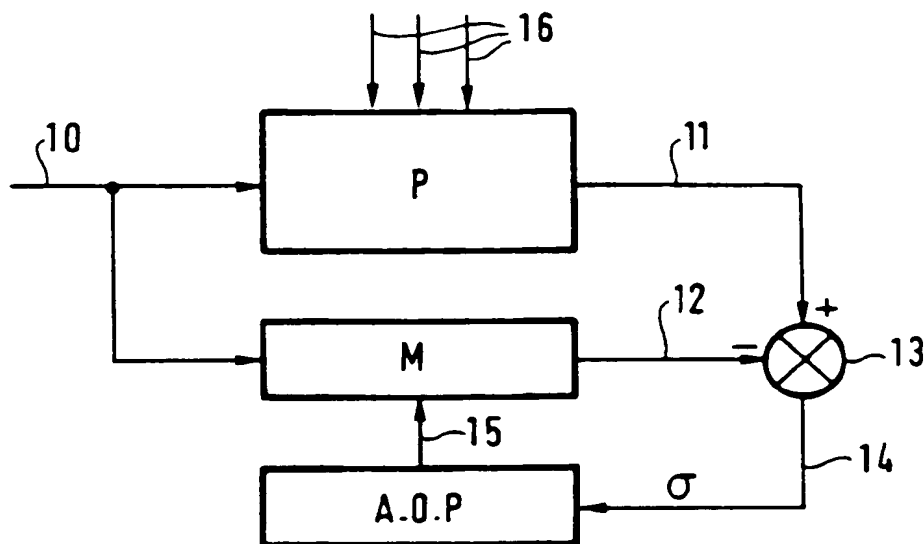


FIG. 2

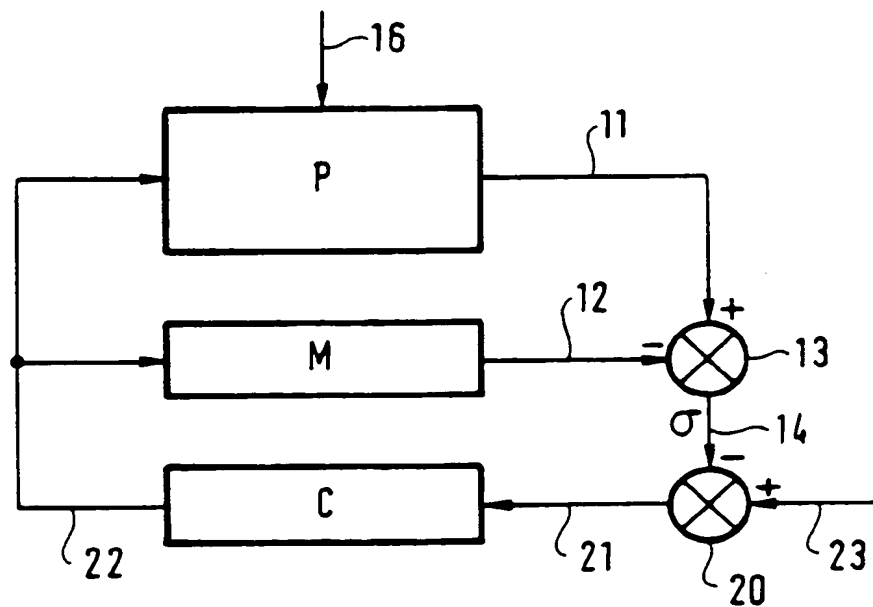


FIG. 3

